



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 198 35 979 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
G 08 G 1/01

②① Aktenzeichen: 198 35 979.9
②② Anmeldetag: 8. 8. 1998
④③ Offenlegungstag: 10. 2. 2000

DE 198 35 979 A 1

⑦① Anmelder:
DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE;
Heusch/Boesefeldt GmbH, 52070 Aachen, DE

⑦② Erfinder:
Kerner, Boris, Prof. Dr., 70619 Stuttgart, DE;
Rehborn, Hubert, Dr., 52064 Aachen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung und Fahrzeugzufußsteuerung in einem Straßenverkehrsnetz

⑤⑦ Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung in einem Straßenverkehrsnetz, bei dem für eine oder mehrere Stellen des Verkehrsnetzes der aktuelle oder ein zukünftig zu erwartender Verkehrszustand ermittelt und zwischen den drei Verkehrszustandsarten freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und Stau unterschieden wird, sowie auf ein Verfahren zur Fahrzeugzufußsteuerung, bei dem der Verkehrszustand eines Verkehrsnetzabschnitts überwacht und der Fahrzeugzufuß zu diesem Verkehrsnetzabschnitt in Abhängigkeit vom erkannten Verkehrszustand gesteuert wird. Erfindungsgemäß ist das Zustandsüberwachungsverfahren so ausgelegt, daß Phasenübergänge zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr und/oder Stauzustände anhand spezieller Kriterien erkannt bzw. prognostiziert werden können. Weiter wird erfindungsgemäß der Fahrzeugzufuß zum überwachten Verkehrsnetzabschnitt in Abhängigkeit von erkannten Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr gesteuert. Verwendung z. B. für Schnellstraßennetze.

DE 198 35 979 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Überwachung des Verkehrszustands in einem Straßenverkehrsnetz nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie auf ein Verfahren zur verkehrszustandsabhängigen Fahrzeugzuflußsteuerung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 8.

Verfahren dieser Art sind auf dem Gebiet der Verkehrsleittechnik verschiedentlich bekannt. Der Verkehrszustand wird hierbei für die jeweilige Überwachungsstelle des Straßenverkehrsnetzes durch Anbringen entsprechender Sensorik meßtechnisch aktuell erfaßt, und/oder es wird der dortige Verkehrszustand im voraus prognostiziert. Hierzu dient üblicherweise ein entsprechend ausgelegter Verkehrsleitrechner, der die Meßdaten und vorzugsweise auch empirisch ermittelte Verkehrszustands-Erwartungswerte über den an der betreffenden Überwachungsstelle zum betreffenden Zeitpunkt zu erwartenden Verkehrszustand geeignet auswertet. Die solchermaßen ermittelten Verkehrszustandsinformationen können dann für verschiedene Zwecke verwendet werden, z. B. zur Reisezeitprognose, zur dynamischen Routenplanung und zu verkehrsleitenden Eingriffen, wie die Steuerung des Fahrzeugzuflusses an Zufahrten zu einem jeweiligen Abschnitt des Verkehrsnetzes, wobei der Begriff "Steuerung" vorliegend der Einfachheit halber in seinem weiteren, neben eigentlichen Steuerungen auch Regelungen umfassenden Sinne zu verstehen ist.

Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die Verkehrszustände in Straßenverkehrsnetzen in drei wesentlich verschiedene Zustandsarten einteilen lassen, und zwar in den Zustand freien Verkehrs, den Zustand synchronisierten Verkehrs und den Stauzustand, siehe B. S. Kerner und H. Rehborn, Experimental features and characteristics of traffic jams, Phys. Rev. E, Band 53, Seite 1297, 1996 sowie B. S. Kerner und H. Rehborn, Experimental properties of complexity in traffic flow, Phys. Rev. E, Band 53, Seite R4275, 1996. Unter freiem Verkehr wird dabei der Zustand verstanden, bei dem jeder Verkehrsteilnehmer seine Geschwindigkeit frei wählen kann und beliebige Überholmanöver möglich sind. Der Stauzustand bedeutet einen Fahrzeugstillstand bei maximaler Verkehrsdichte auf der Straße. Synchronisierter Verkehr, auch zählfließender Verkehr oder Kolonnenverkehr genannt, stellt einen zwischen freiem Verkehr und dem Stauzustand liegenden Verkehrszustand dar, bei dem die Verkehrsstärke, d.h. der Verkehrsfluß, relativ groß sein kann, die Verkehrsdichte jedoch deutlich höher und damit die Geschwindigkeit der Fahrzeuge deutlich kleiner ist als im freien Verkehr, was die Reisezeit sehr stark erhöht. Aufgrund der höheren Verkehrsdichte sind kaum noch Überholmanöver möglich, weshalb sich die Fahrzeuggeschwindigkeit an einem Ort auf den verschiedenen Fahrspuren einer mehrspurigen (Schnell-)Straße synchronisiert, wenn alle Fahrspuren auf einer Fahrtroute liegen.

Zur Erkennung des Stauzustands gibt es bereits zahlreiche Verfahren, bei denen die lokal gemessenen Verkehrsdaten entsprechend analysiert werden, unter Einschluß einer Störfallerkennung und -analyse. Es sei hierzu auf die Offenlegungsschrift DE 196 47 127 A1 und die dort genannte Literatur verwiesen.

Die Fahrzeugzuflußsteuerung, auch Zuflußdosierung genannt, stellt eine der Möglichkeiten dar, bei einer erkannten oder prognostizierten Verkehrsstörung steuernd in den Verkehrsfluß einzugreifen und dadurch das Auftreten von Störungen zu verhindern oder jedenfalls deren Folgen so gering wie möglich zu halten, um Reisezeitverluste zu minimieren und die Leistungsfähigkeit der Straßen zu maximieren. Hierzu existieren bereits zahlreiche unterschiedliche Verfahren zur Zuflußdosierung für Zufahrten von Schnellstraßen. So kam in den USA häufig eine einfache Strategie zum Einsatz, die Zufahrten bei Auftreten von Staus einfach zu schließen, es kamen dort jedoch auch Verfahren zum Einsatz, bei denen die Summe aus Zufluß und stromaufwärtiger Messung im Vergleich zur stromabwärtigen Kapazität der Straße als Kriterium zur Zuflußbeschränkung herangezogen wurde, siehe L. E. Lipp, L. J. Corcoran, A. H. Hickman, Benefits of central computer control for Denver ramp-metering system, Transportation Res. Board Nr. 1320, Washington D. C., 1991 und N. L. Nihan, M. G. H. Bell, A predictive algorithm for real-time ramp control system, ITE Journal, 6/1992. In Großbritannien wurde ein vielschichtiger Algorithmus zur Zuflußregelung eingesetzt, bei dem eine Kontrolle der Straßenkapazitäten durchgeführt wurde und eine Zuflußregelung bei zu kleinen Geschwindigkeiten erfolgte, wobei Verkehrsstärkewellen in ihrem räumlich-zeitlichen Verlauf verfolgt und die Warteschlangenlänge gestauter Fahrzeuge herangezogen wurde, siehe D. Owens, M. J. Schofield, Access control on the M6 motorway: evaluation of Britain's first ramp-metering scheme, Traffic Engineering + Control, Seite 616, 1988. In den Niederlanden wurde ein Konzept der Einzeldosierung bei Fahrzeugumlaufzeiten zwischen 4, 5 Sekunden und 12 Sekunden mit dem letztgenannten als maximal möglichem Wert verfolgt, was einer Dosierung zwischen 300 Fahrzeugen/h und 800 Fahrzeugen/h entspricht, siehe H. Buijn, F. Midelham, Ramp metering control in the Netherlands, Road Traffic Control 5/1990 und Projektbericht DRIVE I Project V 1035 CHRISTIANE - Isolated Ramp Metering: Real Life Study in The Netherlands, Deliverable 7a, März 1991 des EU-Projekts CHRISTIANE. In Frankreich wurde innerhalb des EU-Projekts CHRISTIANE und anschließend bei Feldversuchen in Deutschland der ALINEA-Algorithmus entwickelt und eingesetzt, in Deutschland in einer Modifikation mit der Verkehrsstärke statt des Belegungsgrades, siehe den Projektbericht DRIVE I Project V 1035 CHRISTIANE - Isolated Ramp Metering: Real Life Study in France and Software Prototypes, Deliverable 7b, 10/1991 und P. Stöveken, Verfahren zur Steuerung des Verkehrsablaufs auf Stadtautobahnen mittels Geschwindigkeits- und Zuflußregelung, Straßenverkehrstechnik, 6/1992.

Zur Erhaltung einer möglichst hohen Leistungsfähigkeit der Straße ist nicht nur der Stauzustand, sondern auch der Zustand synchronisiertem Verkehrs von großer Bedeutung. Die Reisezeiten sind bei synchronisiertem Verkehr im Vergleich zum freien Verkehr deutlich erhöht, was schon an sich und zudem für damit zusammenhängende Anwendungen, z. B. Telematikanwendungen, unerwünscht ist. Es besteht daher Bedarf an einem Verfahren, mit dem der Zustand synchronisierten Verkehrs zuverlässig erkannt und insbesondere von demjenigen des freien Verkehrs unterschieden werden kann, um diese Information dann geeignet nutzen zu können, insbesondere auch für eine die Leistungsfähigkeit der Straße bestmöglich ausnutzende Zuflußdosierung und/oder zur Kurzzeitprognose von Reisezeiten.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines Verfahrens zur Verkehrszustandsüberwachung der eingangs genannten Art sowie eines ein solches Überwachungsverfahren nutzenden Fahrzeugzuflußsteuerungsverfahrens zugrunde, mit denen der Verkehrszustand insbesondere hinsichtlich Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr und/oder hinsichtlich Stauzuständen zuverlässig überwacht und bei Bedarf vorausgeschätzt und eine hohe Leistungsfähigkeit des jeweils überwachten Verkehrsnetzabschnittes mit relativ geringem Aufwand in vorteil-

hafter Weise bewerkstelligt werden kann.

Dieses Problem wird durch die Bereitstellung eines Verkehrszustandsüberwachungsverfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 1, 2, 6 oder 7 sowie eines Fahrzeugzuflußsteuerungsverfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 9 gelöst.

Die Überwachungsverfahren gemäß den Ansprüchen 1, 2 und 6 ermöglichen mit relativ einfachen Mitteln eine vergleichsweise zuverlässige Erkennung der Phasenübergänge vom freien zum synchronisierten Verkehr bzw. umgekehrt vom synchronisierten zum freien Verkehr. Es hat sich gezeigt, daß die hierfür in diesen Ansprüchen angegebenen Bedingungen einerseits eine ausreichend sichere Unterscheidung zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr ergeben und andererseits meß- und rechentechnisch mit vertretbarem Aufwand überprüfbar sind. Die hierzu verwendeten Meßgrößen, wie die mittlere Geschwindigkeit, d. h. die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit der die jeweilige Überwachungsstelle auf einer oder mehreren Fahrspuren der Straße passierenden Fahrzeuge, und der Verkehrsfluß, d. h. die Anzahl der pro Zeiteinheit die Überwachungsstelle passierenden Fahrzeuge, sind sensorisch einfach zu erfassen. Unter Verkehrsfluß wird hier und im weiteren immer ein Verkehrsfluß pro Fahrspur verstanden, d. h. entweder für jede Fahrspur oder gemittelt über alle Fahrspuren einer Richtungsfahrbahn. Entsprechend werden Zu- bzw. Abflüsse immer auf die jeweilige Anzahl n der Fahrspuren bezogen, d. h. durch n geteilt. Die große Bedeutung gerade des Phasenübergangs vom freien zum synchronisierten Verkehr für die Gewährleistung der maximal möglichen Leistungsfähigkeit der Straße und zur Verkehrsprognose liegt vor allem auch darin, daß bei synchronisiertem Verkehr der Durchsatz an Fahrzeugen trotz der sehr stark erhöhten Reisezeit nahezu demjenigen bei freiem Verkehr gleichen kann. Die Erkennung des Phasenübergangs zum synchronisierten Verkehr sowie die Auflösung desselben und Rückkehr zum Zustand freien Verkehrs ermöglicht, daß bei auftretendem synchronisiertem Verkehr rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Diese Phasenübergänge können sowohl für den aktuellen Zeitpunkt als auch bei Bedarf darüber hinaus im Rahmen einer Prognose über den zukünftigen Verkehrszustand als ein zu erwartender Phasenübergang ermittelt werden.

Beim Verfahren nach Anspruch 1 werden zur Erkennung eines Phasenübergangs auf synchronisierten Verkehr speziell die mittlere Geschwindigkeit und der Verkehrsfluß daraufhin geprüft, ob die mittlere Geschwindigkeit stärker als vorgegeben abnimmt und der Verkehrsfluß über einem vorgebbaren Flußschwellwert liegt. Die erstgenannte Bedingung nutzt die Erkenntnis, daß beim Übergang von freiem zu synchronisiertem Verkehr die mittlere Geschwindigkeit verhältnismäßig rasch abnimmt. Mit der zweiten Bedingung wird der Zustand synchronisierten Verkehrs vom Stauzustand unterschieden, da in letzterem der Verkehrsfluß deutlich niedriger als bei synchronisiertem Verkehr ist.

Beim Verfahren nach Anspruch 2 werden zur Erkennung des Phasenübergangs auf synchronisierten Verkehr speziell die Bedingungen abgefragt, ob erstens die mittlere Geschwindigkeit abnimmt, ob zweitens der Verkehrsfluß über einem vorgebbaren Flußschwellwert liegt und ob drittens der Quotient aus der Änderung der mittleren Geschwindigkeit dividiert durch die Verkehrsflußänderung betragsmäßig einen vorgebbaren Schwellwert überschreitet. Die letztgenannte Bedingung nutzt die Erkenntnis aus, daß beim Übergang vom freien zum synchronisierten Verkehr die mittlere Geschwindigkeit verhältnismäßig rasch und deutlich abnimmt, während der Verkehrsfluß keine so starke Änderung zeigt.

Bei einem nach Anspruch 3 weitergebildeten Überwachungsverfahren werden im Rahmen einer Verkehrsprognose, d. h. einer Vorausberechnung des zu erwartenden Verkehrszustands in dem Straßenverkehrsnetz bzw. bestimmten Abschnitten hiervon, zukünftige Phasenübergänge vom freien auf den synchronisierten Verkehr vorausgeschätzt, die durch aktuell erkannte derartige Phasenübergänge stromaufwärts hiervon induziert werden. Diese Vorauserkennung zukünftiger Zustände synchronisierten Verkehrs läßt sich vorteilhaft zur verbesserten Schätzung voraussichtlicher Reisezeiten und zur frühzeitigen Einleitung geeigneter Gegenmaßnahmen nutzen, mit denen dieser zu erwartenden Kolonnen- oder gar Staubildung durch entsprechende verkehrsleitende Eingriffe entgegengewirkt werden kann. Das zur Prognose herangezogene Kriterium berücksichtigt auch den Fall, daß Zu- und/oder Abfahrten zwischen der Stelle des aktuell erkannten und derjenigen des prognostizierten stromaufwärtigen synchronisierten Verkehrszustands liegen.

Bei einem nach Anspruch 4 weitergebildeten Überwachungsverfahren wird die Dauer eines durch einen aktuell erkannten Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr induzierten synchronisierten Verkehrszustands stromaufwärts von einer Zu- oder Abfahrt durch spezielle, geeignete Kriterien vorausgeschätzt. Unter Zufahrt ist dabei vorliegend in weiterem Sinne auch eine Engstelle zu verstehen, an der sich die Anzahl der Fahrspuren reduziert. Analog erlaubt ein nach Anspruch 5 weitergebildetes Überwachungsverfahren eine Prognose der räumlichen Ausdehnung eines solchen induzierten synchronisierten Verkehrszustands anhand entsprechender Kriterien.

Beim Verfahren nach Anspruch 6 wird speziell auf einen Phasenübergang vom synchronisierten auf den freien Verkehr geschlossen, wenn die mittlere Geschwindigkeit einen vorgebbaren Geschwindigkeitsschwellwert überschreitet oder oberhalb eines vorgebbaren Geschwindigkeitswerts stärker als ein vorgebbares Maß ansteigt. Die Auflösung von synchronisiertem Verkehr und damit der Übergang zum freien Verkehr erfolgt wegen eines entsprechenden Hysterese-Phänomens erst wieder bei deutlich kleineren Verkehrsstärken als umgekehrt die Bildung von synchronisiertem Verkehr aus zuvor freiem Verkehr. Es zeigt sich daher, daß die erfindungsgemäße Beobachtung der mittleren Geschwindigkeit dahingehend, ob sie einen gewissen Schwellwert überschreitet oder oberhalb eines vorgebbaren Geschwindigkeitswerts stärker als ein vorgebbares Maß ansteigt, ein sehr zuverlässiges Kriterium dafür darstellt, ob sich der Zustand synchronisierten Verkehrs aufgelöst hat und in freien Verkehr übergegangen ist.

Das Überwachungsverfahren nach Anspruch 7 stellt eine Weiterentwicklung des in der genannten Offenlegungsschrift DE 196 47 127 A1 beschriebenen Verfahrens dar und erlaubt eine vergleichsweise zuverlässige Vorausschätzung der Entwicklung eines aktuell entstandenen, detektieren oder eines zukünftig entstehenden, prognostizierten Stauzustands. Diese Stauentwicklungsprognose kann dann z. B. bei einer Reisezeitprognose berücksichtigt werden. Es zeigt sich, daß mit diesem Verfahren der Stauanfang und das Stauende und folglich der Stauzustand insgesamt vergleichsweise zuverlässig in ihrer Entwicklung vorhergesagt werden können.

Bei einer Weiterbildung dieser Stauentwicklungsprognose können gemäß Anspruch 8 die Geschwindigkeitswerte der stromaufwärtigen und/oder der stromabwärtigen Staufront aus bisher vorhandenen Verkehrszustandsdaten für einen zukünftigen Zeitraum vorausgeschätzt werden, wenn in diesem Zeitraum keine aktuelleren Verkehrszustandsdaten gewonnen werden können. Damit sind dann entsprechend auch die zukünftigen Positionen der stromaufwärtigen und/oder

stromabwärtigen Staufront ermittelbar.

Das Zuflußsteuerungsverfahren nach Anspruch 9 nutzt die Erkennung von Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr durch eine Verkehrszustandsüberwachung, wie z. B. insbesondere einer Überwachung nach den Ansprüchen 1 bis 8, zur entsprechenden Steuerung des Fahrzeugzuflusses an einer jeweiligen Zuflußstelle, indem dort der Zufluß in Abhängigkeit dieser Phasenübergänge gesteuert wird. Durch diese Verwendung erkannter Phasenübergänge vom freien zum synchronisierten Verkehr als Grundlage einer Zuflußsteuerung läßt sich der Verkehrsfluß im Straßennetz optimieren, ohne daß dazu sehr häufige Steuereingriffe in den Verkehrsfluß erforderlich sind. Diese geringe Häufigkeit von Steuereingriffen in den Verkehrszufluß hält vorteilhafterweise auch deren Auswirkungen auf die sekundären Verkehrsnetzabschnitte, von denen der Zufluß erfolgt, gering. Insgesamt gewährleistet auf diese Weise das erfindungsgemäße Zuflußsteuerungsverfahren unter den gegebenen Bedingungen eines ständig wachsenden Verkehrsaufkommens ein Optimum an Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzes, insbesondere auf Schnellstraßenabschnitten hiervon.

Gemäß einem nach Anspruch 10 weitergebildeten Zuflußsteuerungsverfahren wird der Zufluß beschränkt, wenn ein Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr an einer der Zuflußstelle stromabwärts und/oder stromaufwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle festgelegt wird.

Bei einem nach Anspruch 11 weitergebildeten Zuflußsteuerungsverfahren wird die zuvor beim Übergang auf synchronisierten Verkehr aktivierte Zuflußbeschränkung dann wieder aufgehoben, wenn ein Phasenübergang auf freien Verkehr an der stromaufwärts und/oder stromabwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle festgestellt wird, d. h. daß sich der zuvor erkannte synchronisierte Verkehr wieder in freien Verkehr aufgelöst hat.

Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, in denen zeigen:

Fig. 1 ein schematisches Blockdiagramm eines dreispurigen Autobahnabschnitts mit mehreren, voneinander beabstandeten Überwachungsstellen zur Verkehrszustandsüberwachung und

Fig. 2 eine schematische Draufsicht auf einen Streckenteil des Autobahnabschnitts von Fig. 1 mit einer Zufahrt.

Das im folgenden anhand eines beispielhaft wiedergegebenen Autobahnabschnittes erläuterte, erfindungsgemäße Verfahren dient zur Minimierung der Reisezeiten im jeweiligen Verkehrsnetz, insbesondere einem Schnellstraßennetz, und zur Erzielung einer möglichst hohen Leistungsfähigkeit dieser Straßen. Hierzu beinhaltet das Verfahren eine Verkehrszustandsüberwachung mit Erkennung von Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr sowie eine vom solchermaßen erkannten Verkehrszustand abhängige Zufahrt dosierung an Zufahrten, d. h. Einfahrten, von insbesondere mehrspurigen Schnellstraßen, die somit auf der Erkennung der Phasenübergänge zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr aufbaut. Mit dieser speziellen verkehrszustandsabhängigen Zuflußsteuerung kann eine maximale Straßenleistungsfähigkeit bei gleichzeitig möglichst geringen Reisezeiten erzielt werden, wobei relativ wenig Eingriffe in den fließenden Verkehr in Form der Zuflußbeschränkungen vorgenommen werden. Denn eine Zuflußbeschränkung braucht vorliegend immer erst dann erfolgen, wenn der überwachte Verkehrszustand vom freien Verkehr zum synchronisierten Verkehr übergeht. Die weiteren Einzelheiten werden nun unter Bezugnahme auf den gezeigten Verkehrsnetzabschnitt erläutert.

Fig. 1 zeigt beispielhaft einen dreispurigen Autobahnabschnitt AF zwischen einem stromaufwärtigen Autobahnkreuz AK1 und einem stromabwärtigen Autobahnkreuz AK2. Über den Autobahnabschnitt AF hinweg sind zehn Meßstellen M_1 bis M_{10} in Form jeweiliger Induktionsschleifendetektoren mit Meßstellenabständen zwischen 500 m und 1200 m vorgesehen. Die Meßstellen M_1 bis M_{10} liefern an eine herkömmliche, nicht gezeigte Verkehrsleitzentrale, die mit einem Großrechner zur Verkehrsüberwachung und Verkehrsleitung ausgerüstet ist, minütlich Verkehrsmeßdaten in Form der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit und des Verkehrsflusses individuell für jede der drei Fahrspuren. Je nach Bedarf kann jede Fahrspur individuell ausgewertet werden, oder es werden über alle Fahrspuren gemittelte Werte von Geschwindigkeit und Verkehrsfluß, d. h. Verkehrsstärke, verwendet. Alternativ können auch andere herkömmliche Techniken zur Erfassung und Auswertung der verkehrszustandsrelevanten Daten zur Anwendung kommen, z. B. aus Verkehrsmessungen mittels Infrarotdetektoren oder Videokameras, aus Stichprobenfahrzeugdaten, d. h. sogenannten Floating-Car-Daten, oder aus Messungen des Belegungsgrades oder des Fahrzeugabstands. Des weiteren können die Daten auch aus einer Ganglinienprognose gewonnen werden.

In Fig. 2 ist beispielhaft ein Bereich des Autobahnabschnitts von Fig. 1 gezeigt, der eine Zufahrt Z beinhaltet, wobei schematisch die dieser Zufahrt Z stromabwärts nächstgelegene Meß- bzw. Überwachungsstelle M_{i+1} und die ihr stromaufwärts nächstgelegene Meß- bzw. Überwachungsstelle M_i wiedergegeben sind. An der Zufahrt Z sind geeignete Zuflußsteuermittel 1, z. B. in Form einer steuerbaren Schranke oder Lichtsignalanlage, vorgesehen, mit denen der Zufluß q_z an Fahrzeugen, die über die Zufahrt Z in den Autobahnabschnitt einfahren, verkehrszustandsabhängig gesteuert werden kann. Dazu stehen die Zuflußsteuermittel mit der Verkehrsleitzentrale in Datenaustauschverbindung. Speziell ist für diese Zuflußregelung vorgesehen, daß der Zufluß q_z dann beschränkt, d. h. ausreichend reduziert wird, wenn im angrenzenden Autobahnabschnitt ein Phasenübergang von freiem Verkehr zu synchronisiertem Verkehr festgestellt wird, sei es aktuell oder als ein mittels einer Verkehrsprognose zukünftig erwarteter Verkehrszustand. Sobald dann später wieder die Auflösung des synchronisierten Verkehrs, d. h. ein Phasenübergang zum freien Verkehr, festgestellt wird, wird die Zuflußbeschränkung wieder aufgehoben.

Um diese verkehrszustandsabhängige Zuflußregelung zu bewerkstelligen, beinhaltet das Zustandsüberwachungsverfahren folgende Maßnahmen. Für alle Meßstellen oder allgemeiner Überwachungsstellen, welche die "Stützstellen" für die Auswertung der Verkehrszustandsmeßdaten und gegebenenfalls für die Prognose zukünftiger Verkehrszustände durch den Verkehrsleitrechner darstellen, werden mit einer beliebigen herkömmlichen Erfassungsmethode die mittlere Geschwindigkeits- und Verkehrsstärkewerte sowie deren zeitliche Änderungen für die Fahrspuren einzeln oder insgesamt ermittelt bzw. prognostiziert und ausgewertet. Diese Auswertung beinhaltet neben weiteren, herkömmlichen und daher hier nicht weiter interessierenden Maßnahmen die Feststellung, ob sich an der betreffenden Überwachungsstelle ein Phasenübergang zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr ereignet. Je nach Systemauslegung kann zusätzlich die Erstellung diverser Verkehrszustandsprognosen vorgesehen sein, z. B. eine Prognose über die weitere Entwicklung des Verkehrsablaufs nach einem erkannten Phasenübergang, eine Prognose über Phasenübergänge, die von einem er-

kannten Phasenübergang stromaufwärts desselben induziert werden, eine Prognose über Stauentstehung und/oder eine Prognose der weiteren Entwicklung des synchronisierten Verkehrs durch aktuelle Messungen in der Hauptfahrtrichtung, durch eine Vorhersage des Ergebnisses der Zuflußregelung und/oder durch eine Ganglinienprognose des Zuflusses. Unter Ganglinienprognose ist hierbei eine solche zu verstehen, die auf empirischen Daten über den am betreffenden Ort zum betreffenden Zeitpunkt wahrscheinlich zu erwartenden Verkehrszustand basiert. Wenn durch eine beliebige Prognose oder entsprechende Messungen des Verkehrsablaufs eine Stauentstehung erkannt worden ist, kann eine Prognose der weiteren Entwicklung bzw. eine entsprechende Reisezeitprognose beispielsweise durch das in der oben zitierten Patentanmeldung DE 196 47 127 A1 beschriebene Verfahren oder ein demgegenüber wie folgt modifiziertes Verfahren durchgeführt werden.

Bei diesem Verfahren werden die Positionen x_l und/oder x_r der stromaufwärtigen bzw. stromabwärtigen Stauflanke des meßtechnisch oder durch Prognose erfaßten aktuellen oder zukünftig erwarteten Staus nach den folgenden Beziehungen vorausgeschätzt:

$$x_l(t) = - \int_{t_0}^t \frac{q_0(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_0(t)} dt, \quad t \geq t_0$$

$$x_r(t) = - \int_{t_1}^t \frac{q_{out}(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}(t)} dt, \quad t \geq t_1$$

Dabei bezeichnen ρ_{\min} die stromabwärtige Verkehrsdichte hinter dem Stau, die durch eine beliebige Methode bestimmt oder anhand der Beziehung $\rho_{\min} = q_{out}(t) / w_{\max}(t)$ bestimmt wird, und ρ_0 die stromaufwärtige Verkehrsdichte vor dem Stau, die ebenfalls durch eine beliebige herkömmliche Methode bestimmt oder durch die Beziehung $\rho_0 = q_0(t) / w_0(t)$ berechnet werden kann. Weiter bedeuten q_{out} und w_{\max} der Fluß bzw. die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit des Verkehrs an der betreffenden stromabwärtigen Überwachungsstelle hinter dem Stau und q_0 sowie w_0 den Fluß und die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit des Verkehrs an der entsprechenden stromaufwärtigen Überwachungsstelle vor dem Stau. Der Zeitpunkt t_0 ist derjenige, zu dem an einem bestimmten Ort durch eine beliebige Meß- oder Prognosemethode die stromaufwärtige Stauflanke eines Staus erkannt bzw. prognostiziert wird, während t_1 den Zeitpunkt bezeichnet, zu dem an einem Ort durch eine beliebige Meß- oder Prognosemethode die stromabwärtige Stauflanke des Staus erkannt bzw. prognostiziert wird. Bei einer Messung des Belegungsgrades, wie z. B. in USA üblich, sind in den angegebenen Beziehungen die Verkehrsdichtewerte ρ_{\min} , ρ_{\max} und ρ_0 durch die entsprechenden, mit einem Faktor λ skalierten Belegungsgradwerte B_{\min} , B_{\max} bzw. B_0 zu ersetzen. Vorzugsweise werden zur Durchführung einer Prognose der Stauentwicklung und Staupfortpflanzung alle Werte des Integranden, d. h. q_{\min} , q_{out} , q_0 , ρ_{\max} , ρ_{\min} und ρ_0 , durch eine beliebige herkömmliche Ganglinienprognose bestimmt. Im übrigen erfolgt die Vorgehensweise entsprechend dem in der Offenlegungsschrift DE 196 47 127 A1 offenbarten Verfahren, worauf für weitere Details verwiesen kann.

Im Rahmen dieser Stauverlaufsprognose kann der Fall auftreten, daß bestimmte Meß- bzw. Überwachungsstellenwerte ab einem Zeitpunkt $t^{(k)}$ stromaufwärts des Staus und/oder ab einem Zeitpunkt $t^{(m)}$ stromabwärts des Staus nicht mehr verwendet werden können, d. h. die Verkehrszustandsparameter stromaufwärts und stromabwärts des Staus können nur bis zum Zeitpunkt $t^{(k)}$ bzw. $t^{(m)}$ gemessen oder durch eine Ganglinienprognose bestimmt werden. In diesem Fall ist erfindungsgemäß vorgesehen, für die weitere Prognose mittlere Geschwindigkeitswerte v_{gr} , v_{gl} für die stromabwärtige bzw. stromaufwärtige Stauflanke aus den bislang erfaßten Verkehrszustandsdaten nach den folgenden Beziehungen abzuleiten:

$$v_{gr} = - \frac{1}{k} \sum_{t=t_0}^{t^{(k)}} \frac{q_{out}(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}(t)}, \quad \text{mit } k = \frac{t^{(k)} - t_0}{\Delta t}$$

$$v_{gl} = - \frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t^{(m)}} \frac{q_0(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_0(t)}, \quad \text{mit } m = \frac{t^{(m)} - t_1}{\Delta t}$$

wobei Δt die Zykluszeit des Prognoseverfahrens bedeutet und ein zu validierender Parameter desselben ist. Aus den so vorausgeschätzten mittleren Geschwindigkeiten v_{gr} , v_{gl} für die stromabwärtige und stromaufwärtige Stauflanke lassen sich dann die zugehörigen Stauflanken-Ortskoordinaten x_r , x_l nach den folgenden Beziehungen vorausbestimmen:

$$x_r(t) = x_r(t^{(k)}) - |v_{gr}|(t - t^{(k)}), \quad \text{mit } t \geq t^{(k)}$$

$$x_l(t) = x_l(t^{(m)}) - |v_{gl}|(t - t^{(m)}), \quad \text{mit } t \geq t^{(m)}$$

Analog dazu kann die Geschwindigkeit v_{gr} der stromabwärtigen Stauflanke auch als charakteristischer Erfahrungswert einer beliebigen Straße ermittelt und verwendet werden. Die Geschwindigkeitswerte v_{gr} , v_{gl} der stromabwärtigen bzw. stromaufwärtigen Stauflanke können auch direkt mit einem Ganglinienverfahren bestimmt werden.

Die Feststellung eines Phasenübergangs vom freien zum synchronisierten Verkehr ist zuverlässig mit folgender Vorgehensweise möglich. Für eine jeweilige Überwachungsstelle werden die Differenzen $dv_{t1, t2}$ der mittleren Geschwindigkeitswerte v_{t1} , v_{t2} zweier zeitlich hintereinanderliegender, zu den Zeitpunkten t_1 bzw. $t_2 = t_1 + \Delta t$ durchgeführter Meßzyklen bestimmt, wobei Δt ein beliebig größer null wählbares Zeitintervall ist, das einen zu validierenden Parameter des Verfahrens darstellt. Daraufhin wird festgestellt, ob die betreffenden Geschwindigkeitsdifferenzen $dv_{t1, t2} = v_{t2} - v_{t1}$ zum

einen kleiner als null sind und zum anderen betraglich über einem vorgebbaren Geschwindigkeitsschwellwert v_G liegen, d. h. ob die Bedingungen $dv_{t1,t2} < 0$ und $|dv_{t1,t2}| > v_G$ erfüllt sind. Des weiteren wird der Verkehrsfluß q_{t2} zum betreffenden Zeitpunkt t_2 ermittelt und festgestellt, ob er einen vorgebbaren Flußgrenzwert q_G überschreitet, d. h. ob die Bedingung $q_{t2} > q_G$ erfüllt ist. Sind alle drei oben genannten Bedingungen erfüllt, wird dies als ein auftretender Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr interpretiert. Es zeigt sich, daß die Methode hierfür sehr zuverlässig ist. Die beiden Geschwindigkeitsbedingungen tragen der Tatsache Rechnung, daß gerade bei diesem Phasenübergang ein vergleichsweise schneller Abfall der mittleren Geschwindigkeit auftritt. Mit der Verkehrsflußbedingung wird der synchronisierte Verkehr zum einen sicher vom Stauzustand und zum anderen von Zuständen freien Verkehrs mit geringerem Verkehrsfluß unterschieden.

Bei einer alternativen Vorgehensweise zur Erkennung eines auftretenden Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr werden, wie bei der obigen Methode, die mittleren Geschwindigkeiten v_{t1} , v_{t2} zweier zeitlich hintereinanderliegender Meßzyklen erfaßt und geprüft, ob deren Differenzen $dv_{t1,t2} = v_{t2} - v_{t1}$ kleiner als null sind. Ebenso wird der Verkehrsfluß q_{t2} zum Zeitpunkt t_2 erfaßt und geprüft, ob dieser größer als ein vorgegebener Flußschwellwert q_G ist. Des weiteren werden im Unterschied zur obigen Methode die Differenz $dq_{t1,t2} = q_{t2} - q_{t1}$ der Verkehrsstärkewerte q_{t1} , q_{t2} zu den beiden zeitlich hintereinanderliegenden Meßzykluszeitpunkten t_1 , t_2 und anschließend der Quotient $dv_{t1,t2}/dq_{t1,t2}$ der Differenz $dv_{t1,t2}$ der mittleren Geschwindigkeiten dividiert durch die Differenz $dq_{t1,t2}$ der zugehörigen Verkehrsflüsse gebildet. Dann wird geprüft, ob dieser Quotient $dv_{t1,t2}/dq_{t1,t2}$ betragsmäßig einen vorgebbaren Schwellwert überschreitet. Diese Bedingung an den gebildeten Quotienten tritt an die Stelle der Geschwindigkeitsschwellwertbedingung der zuvor oben angegebenen Methode. Wenn alle drei Bedingungen erfüllt sind, wird dies wiederum als ein auftretender Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr interpretiert. Es zeigt sich, daß auch die Quotientenbedingung hierfür gut geeignet ist. Sie trägt der Tatsache Rechnung, daß sich beim Übergang vom freien zum synchronisierten Verkehr die mittlere Geschwindigkeit stärker ändert, d. h. verringert, als der Verkehrsfluß, welcher bekanntlich dem Produkt aus Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit entspricht. Die Abnahme der mittleren Geschwindigkeit wird beim Übergang vom freien zum synchronisierten Verkehr wenigstens teilweise von der zunehmenden Verkehrsdichte kompensiert, die erst das Auftreten von synchronisiertem Verkehr verursacht.

Wenn auf eine der obigen Arten ein auftretender Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr an einer bestimmten Überwachungsstelle zu einem gewissen Zeitpunkt erkannt wird, ist vorzugsweise des weiteren vorgesehen, eine Prognose durchzuführen, ob durch den erkannten, aufgetretenen Phasenübergang stromaufwärts desselben ein entsprechender Phasenübergang zu einem späteren Zeitpunkt induziert wird. Dies wird dann angenommen, wenn zum gegenwärtigen Zeitpunkt, zu dem der Phasenübergang an der betreffenden Überwachungsstelle festgestellt wurde, dort ein kleinerer Verkehrsfluß festgestellt wird als an einer davon stromaufwärts liegenden Stelle. Denn in diesem Fall ist der Zufluß an Fahrzeugen zum Ort des sich bildenden synchronisierten Verkehrs höher als der Fahrzeugabfluß, so daß sich die Zone mit synchronisiertem Verkehr in stromaufwärtiger Richtung ausbreitet. Das obige Kriterium gilt streng genommen für den Fall, daß sich zwischen den beiden betreffenden Stellen keine Zu- und Abfahrten befinden. Dieser Fall kann jedoch durch eine einfache Modifikation dieses Kriteriums berücksichtigt werden, bei welcher der Verkehrsfluß am Ort des aktuellen Phasenübergangs um eventuelle Zuflüsse an Zufahrten reduziert bzw. um eventuelle Abflüsse an Abfahrten erhöht wird. Das Kriterium ist daher, daß der Verkehrsfluß am Ort des aktuellen Phasenübergangs kleiner ist als die Summe des Verkehrsflusses an der stromaufwärtigen Stelle zuzüglich der Differenz etwaiger Zu- und Abflüsse zwischen den beiden Stellen.

In ähnlicher Weise kann bei Bedarf eine Prognose über Dauer und/oder räumliche Ausdehnung eines synchronisierten Verkehrszustands nach Erkennung eines entsprechenden Phasenübergangs vom freien zum synchronisierten Verkehr stromaufwärts von einer Zu- oder Abfahrt erfolgen, wenn die oben genannten Bedingungen für einen induzierten stromaufwärtigen Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr vorliegen. Unter dem Begriff Zufahrt sind hierbei auch Engstellen zu verstehen, an denen sich die Anzahl der Fahrspuren verringert. Für die Prognose über die Dauer dieses bleibenden synchronisierten Verkehrs wird angenommen, daß dieser andauert, solange der Verkehrsfluß auf der Zufahrt einen bestimmten, vorgebbaren Wert überschreitet oder die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Abfahrt geringer als ein bestimmter, vorgebbarer Wert ist und darüber hinaus als zweite Bedingung der Verkehrsfluß stromaufwärts auf der Hauptfahrbahn einen bestimmten, vorgebbaren Wert überschreitet. Für die Prognose über die räumliche Ausdehnung des synchronisierten Verkehrszustands stromaufwärts einer Zu- bzw. Abfahrt wird angenommen, daß die stromabwärtige Grenze des andauernden synchronisierten Verkehrszustands bei der betreffenden Zu- bzw. Abfahrt verbleibt oder sich an dem Ort befindet, bei dem ein Phasenübergang vom synchronisierten zum freien Verkehr erkannt wird, und die stromaufwärtige Grenze desselben sich daraus ergibt, daß dort entweder die oben genannten Bedingungen für einen induzierten stromaufwärtigen Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr nicht mehr erfüllt sind oder ein breiter Stau entsteht, dessen weiterer Verlauf dann mit der erwähnten Stauentwicklungsprognose weiterverfolgt werden kann. Die stromabwärtige Grenze des Staus bestimmt in diesem Fall die stromaufwärtige Grenze des vorausgeschätzten synchronisierten Verkehrszustands.

Die Auflösung von synchronisiertem Verkehr und damit der Übergang zum freien Verkehr geht nicht so leicht vonstatten wie umgekehrt die Bildung von synchronem Verkehr aus freiem Verkehr bei zunehmenden Verkehrsaufkommen. Erfahrungsgemäß steigt dann in der Endphase eines Auflösungsprozesses von synchronem Verkehr, d. h. am Phasenübergang zum freien Verkehr, die mittlere Geschwindigkeit auf deutlich höhere Werte als zuvor an. Zur Erkennung von Phasenübergängen vom synchronen zum freien Verkehr genügt daher in der Praxis das Kriterium, daß die mittlere Geschwindigkeit einen vorgebbaren weiteren Geschwindigkeitsschwellwert überschreitet. Alternativ kann auch das Kriterium herangezogen werden, ob die zeitliche Änderung der mittleren Geschwindigkeit einen zugehörigen Schwellwert überschreitet und die mittlere Geschwindigkeit ihrerseits über einen zugehörig vorgegebenen Schwellwert liegt.

Die oben erläuterte Erkennung von Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr wird nun in einem Fahrzeugzuflußsteuerungsverfahren dazu genutzt, den Fahrzeugzufluß in Abhängigkeit vom Auftreten dieser Phasenübergänge zu regeln. Die verschiedenen Möglichkeiten dieser Zuflußregelung werden im Folgenden anhand des Beispiels von Fig. 2 beschrieben. In einer ersten Variante wird diejenige Überwachungsstelle M_{i+1} , die der jeweiligen Zu-

flußstelle Z stromabwärts am nächsten liegt, auf das Auftreten solcher Phasenübergänge hin überwacht. Solange der Verkehrsleitrechner hier freien Verkehr erkennt, hält er die Zuflußsteuermittel 1 der Zufahrt Z inaktiv, d. h. Fahrzeuge können von dort unbeschränkt einfahren. Sobald der Leitreechner einen auftretenden Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr an der stromabwärtigen Überwachungsstelle M_{i+1} feststellt, aktiviert er die Zuflußsteuermittel 1 und beschränkt dadurch den Fahrzeugzufluß q_e über die Zufahrt Z auf ein vorgebbares Maß, das vorzugsweise situationsabhängig variabel vorgegeben werden kann, z. B. in Abhängigkeit von der Anzahl von Fahrspuren auf der Hauptstrecke und/oder von gemessenen oder prognostizierten Werten für den Verkehrsfluß auf der Hauptstrecke stromaufwärts des entstehenden synchronisierten Verkehrs. In einer vereinfachten Realisierung kann auch ein komplettes Schließen der Zufahrt Z in den Zeiträumen synchronisierten Verkehrs vorgesehen sein. Wenn dann der Leitreechner anhand der mittleren Geschwindigkeitswerte an der betreffenden Überwachungsstelle M_{i+1} feststellt, daß dort ein umgekehrter Phasenübergang vom synchronisierten zum freien Verkehr stattgefunden hat, d. h. daß sich der synchrone Verkehr in freien Verkehr aufgelöst hat, hebt er durch entsprechende Ansteuerung der Zuflußsteuermittel 1 die Zufahrtsbeschränkung wieder auf.

Eine zweite Variante besteht in einem zur obigen, ersten Variante analogen Vorgehen, das sich von diesem nur dadurch unterscheidet, daß statt der der Zufahrt Z stromabwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle M_{i+1} die stromaufwärts nächstgelegene Überwachungsstelle M_i verwendet wird, d. h. der Verkehrsleitrechner detektiert das Auftreten von Phasenübergängen vom freien zum synchronisierten Verkehr und umgekehrt an dieser stromaufwärtigen Stelle M_i . Liegt dort freier Verkehr vor, erfolgt keine Beschränkung des Zuflusses über die Zufahrt Z, während bei einem Übergang zum synchronisierten Verkehr die Zuflußsteuermittel 1 diesen Zufluß q_e situationsabhängig beschränken.

In zwei weiteren Varianten wird das Auftreten von Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr sowohl an der stromaufwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle M_i als auch an der stromabwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle M_{i+1} der jeweiligen Zufahrt Z überwacht. Eine Beschränkung des Zuflusses q_e über die Zufahrt Z wird dann in der einen dieser beiden Varianten zu dem Zeitpunkt ausgelöst, zu welchem ein auftretender Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr an der der Zufahrt Z stromaufwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle M_i festgestellt wird. Die Zuflußbeschränkung wird anschließend zu dem Zeitpunkt wieder aufgehoben, zu dem an der der Zufahrt Z stromabwärts nächstliegenden Überwachungsstelle M_{i+1} der umgekehrte Phasenübergang vom synchronen zum freien Verkehr festgestellt wird, z. B. indem dort die mittlere Geschwindigkeit einen vorgebbaren Schwellwert überschreitet. Bei der anderen, von beiden Überwachungsstellen M_i , M_{i+1} Gebrauch machenden Variante sind deren Rollen vertauscht, d. h. eine Zufahrtsbeschränkung wird ausgelöst, wenn an der stromabwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle M_{i+1} ein Phasenübergang vom freien zum synchronisierten Verkehr festgestellt wird, und die Zufahrtsbeschränkung wird wieder aufgehoben, wenn an der stromaufwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle M_i der umgekehrte Phasenübergang vom synchronisierten zum freien Verkehr registriert wurde.

Die Anwendung des oben in vorteilhaften Realisierungen erläuterten Verfahrens zur Zuflußsteuerung in Abhängigkeit von auftretenden Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr ermöglicht eine hohe Leistungsfähigkeit entsprechend überwachter und zuflußgeregelter Straßen, verringerte Reisezeiten und zuverlässige Verkehrsprognosen, indem auch bei großem Verkehrsaufkommen so lange wie möglich der Zustand freien Verkehrs aufrechterhalten wird und optional eine Vorhersage über die Entwicklung des synchronisierten Verkehrs bzw. eines entstehenden Staus getroffen wird. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die Lebensdauer der Zustände synchronisierten Verkehrs durch den zuflußbeschränkenden Steuereingriff minimiert. Es versteht sich, daß neben den oben beschriebenen weitere Realisierungen der Erfindung möglich sind. Insbesondere ist klar, daß die erwähnten Schwellwerte und Phasenübergangskriterien je nach Anwendungsfall vom Fachmann geeignet und bei Bedarf situationsabhängig variabel festgelegt werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung in einem Straßenverkehrsnetz, bei dem
 - für eine oder mehrere Stellen (M1 bis M10) des Verkehrsnetzes der aktuelle oder ein zukünftig zu erwartender Verkehrszustand ermittelt und
 - zwischen den drei Verkehrszustandsarten freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und Stau unterschieden wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß
 - auf einen Phasenübergang von freiem zu synchronisiertem Verkehr geschlossen wird, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:
 - (i) die mittlere Geschwindigkeit (v) nimmt stärker als ein vorgebbares Maß ab und
 - (ii) der Verkehrsfluß (q) liegt über einem vorgebbaren Flußschwellwert (q_G).
2. Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung in einem Straßenverkehrsnetz, bei dem
 - für eine oder mehrere Stellen (M1 bis M10) des Verkehrsnetzes der aktuelle oder ein zukünftig zu erwartender Verkehrszustand ermittelt und
 - zwischen den drei Verkehrszustandsarten freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und Stau unterschieden wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß
 - auf einen Phasenübergang von freiem zu synchronisiertem Verkehr geschlossen wird, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:
 - (i) die mittlere Geschwindigkeit (v) nimmt ab,
 - (ii) der Verkehrsfluß (q) liegt über einem vorgebbaren Flußschwellwert (q_G) und
 - (iii) der Betrag des Quotienten (dv/dq) aus der Änderung (dv) der mittleren Geschwindigkeit (v) dividiert durch die Änderung (dq) des Verkehrsflusses (q) überschreitet einen vorgebbaren Schwellwert.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, weiter **dadurch gekennzeichnet**, daß bei Erkennung eines aktuellen Phasenübergangs von freiem zu synchronisiertem Verkehr der Verkehrsfluß am Ort des aktuellen Phasenübergangs und derjenige stromaufwärts davon erfaßt und miteinander verglichen werden und auf das Auftreten eines induzierten

zukünftigen Phasenübergangs von freiem zu synchronisiertem Verkehr an einer stromaufwärtigen Stelle geschlossen wird, wenn der Verkehrsfluß am Ort des aktuellen Phasenübergangs kleiner ist als die Summe des Verkehrsflusses an der stromaufwärtigen Stelle zuzüglich der Differenz etwaiger Zu- und Abflüsse zwischen den beiden Stellen.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, weiter dadurch gekennzeichnet, daß bei Erkennung eines aktuellen Phasenübergangs von freiem zu synchronisiertem Verkehr stromaufwärts einer Zu- oder Abfahrt die Dauer eines dadurch induzierten, stromaufwärtigen synchronisierten Verkehrszustands prognostiziert wird, indem auf dessen Andauern geschlossen wird, solange zum einen der Verkehrsfluß auf der Zufahrt einen vorgebbaren Schwellwert überschreitet oder die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit in der Abfahrt geringer als ein vorgebbarer Schwellwert ist und zum anderen der Verkehrsfluß stromaufwärts der Hauptfahrbahn einen vorgebbaren Schwellwert überschreitet.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, weiter dadurch gekennzeichnet, daß bei Erkennung eines aktuellen Phasenübergangs von freiem zu synchronisiertem Verkehr stromaufwärts einer Zu- oder Abfahrt die räumliche Ausdehnung eines dadurch induzierten, stromaufwärtigen synchronisierten Verkehrszustands prognostiziert wird, indem einerseits angenommen wird, daß die stromabwärtige Flanke des synchronisierten Verkehrszustands bei der Zu- bzw. Abfahrt verbleibt oder sich an dem Ort befindet, bei dem ein Phasenübergang vom synchronisierten zum freien Verkehr erkannt wird, und andererseits auf die Position der stromaufwärtigen Flanke des synchronisierten Verkehrszustands dadurch geschlossen wird, daß entweder die Bedingungen für einen induzierten Phasenübergang von freiem zu synchronisiertem Verkehr dort nicht mehr erfüllt sind oder die Entstehung eines breiten Staus festgestellt wird.

6. Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung in einem Straßenverkehrsnetz, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem

- für eine oder mehrere Stellen (M1 bis M10) des Verkehrsnetzes der aktuelle oder ein zukünftig zu erwartender Verkehrszustand ermittelt und
- zwischen den drei Verkehrszustandsarten freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und Stau unterschieden wird, dadurch gekennzeichnet, daß
- auf einen Phasenübergang von synchronisiertem zu freiem Verkehr geschlossen wird, wenn die mittlere Geschwindigkeit (v) einen vorgebbaren Geschwindigkeitsschwellwert (v_G) überschreitet oder oberhalb eines vorgebbaren Geschwindigkeitsschwellwertes stärker als ein vorgebbares Maß ansteigt.

7. Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung in einem Straßennetz, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem

- für eine oder mehrere Stellen (M1 bis M1) des Verkehrsnetzes der aktuelle oder ein zukünftig zu erwartender Verkehrszustand ermittelt und
- zwischen den drei Verkehrszustandsarten freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und Stau unterschieden, dadurch gekennzeichnet, daß nach Erkennung eines Staus dessen weiterer Verlauf prognostiziert wird, indem laufend eine Schätzung der zeitabhängigen Positionen (x_l) und/oder (x_r) der stromaufwärtigen Stauflanke bzw. der stromabwärtigen Stauflanke nach den Beziehungen

$$x_l(t) = - \int_{t_0}^t \frac{q_0(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_0(t)} dt, \quad t \geq t_0$$

$$x_r(t) = - \int_{t_1}^t \frac{q_{out}(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}(t)} dt, \quad t \geq t_1$$

vorgenommen wird, wobei

- (i) q_{\min} in der Verkehrsfluß im Stau und ρ_{\max} die Verkehrsdichte im Stau sind,
- (ii) t_0 der Zeitpunkt ist, zu dem an einem Ort die stromaufwärtige Stauflanke eines Staus erkannt oder prognostiziert wird,
- (iii) t_1 der Zeitpunkt ist, zu dem an einem Ort die stromabwärtige Stauflanke des Staus erkannt oder prognostiziert wird,
- (iv) q_{out} und ρ_{\min} der Fluß bzw. die Verkehrsdichte stromabwärts hinter dem Stau und
- (v) q_0 und ρ_0 der Fluß bzw. die Verkehrsdichte stromaufwärts vor dem Stau sind.

8. Verfahren nach Anspruch 7, weiter dadurch gekennzeichnet, daß die Geschwindigkeiten (v_{gr}, v_{gl}) für die stromabwärtige und/oder die stromaufwärtige Stauflanke aus bislang erfaßten Verkehrszustandsdaten ab einem Zeitpunkt $t^{(k)}$ bzw. $t^{(m)}$ gemäß den nachfolgenden Beziehungen vorausgeschätzt werden:

$$v_{gr} = - \frac{1}{k} \sum_{i=t_0}^{t^{(k)}} \frac{q_{out}(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}(t)}, \quad \text{mit } k = \frac{t^{(k)} - t_0}{\Delta t},$$

$$v_{gl} = - \frac{1}{m} \sum_{i=t_1}^{t^{(m)}} \frac{q_0(t) - q_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_0(t)}, \quad \text{mit } m = \frac{t^{(m)} - t_1}{\Delta t},$$

wobei Δt die zu validierende Prognosezykluszeit und k bzw. m die Anzahl berücksichtigter, durchgeführter Überwachungszyklen bedeuten.

9. Verfahren zur Zuflußsteuerung in einem Straßenverkehrsnetz, bei dem

- der Verkehrszustand eines Verkehrsnetzabschnittes überwacht und



- der Fahrzeugzufluß zu diesem Verkehrsnetzabschnitt in Abhängigkeit vom erkannten Verkehrszustand gesteuert wird, dadurch gekennzeichnet, daß
- die Verkehrszustandsüberwachung eine Erkennung von Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr, insbesondere durch das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, beinhaltet und
- der Fahrzeugzufluß an der jeweiligen Zuflußstelle (Z) in Abhängigkeit von den durch die Verkehrszustandsüberwachung erkannten Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr gesteuert wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, weiter dadurch gekennzeichnet, daß der Fahrzeugzufluß an der jeweiligen Zuflußstelle (Z) beschränkt wird, wenn ein Phasenübergang von freiem zu synchronisiertem Verkehr alternativ nur an einer der Zuflußstelle stromabwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle (M_{i+1}) oder nur an einer der Zuflußstelle stromaufwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle (M_i) oder an beiden Überwachungsstellen festgestellt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, weiter dadurch gekennzeichnet, daß die Zuflußbeschränkung aufgehoben wird, wenn ein Phasenübergang von synchronisiertem zu freiem Verkehr alternativ nur an der der Zuflußstelle (Z) stromabwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle (M_{i+1}) oder nur an der der Zuflußstelle (Z) stromaufwärts nächstgelegenen Überwachungsstelle (M_i) oder an beiden Überwachungsstellen festgestellt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

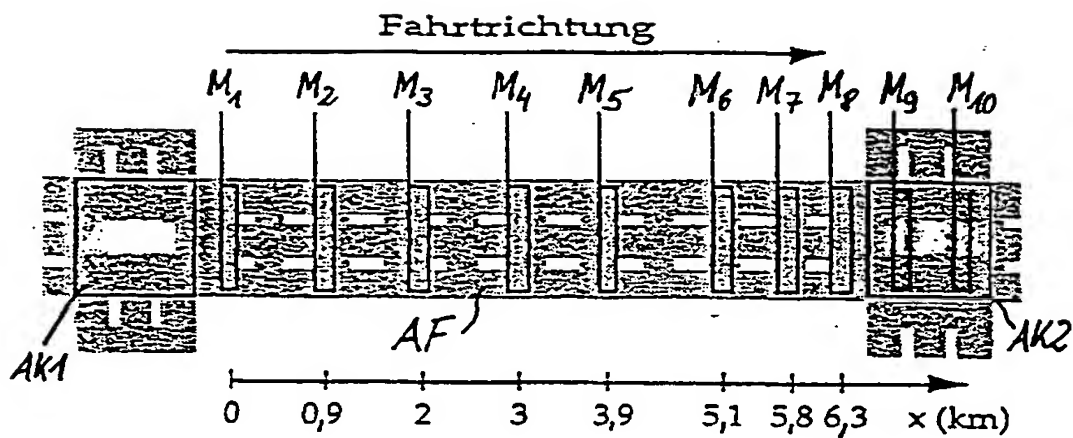


Fig. 1

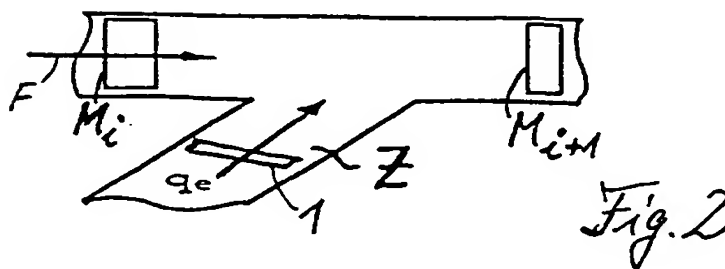


Fig. 2